

Análisis de interferencia entre las tecnologías inalámbricas Bluetooth e IEEE 802.11g

Fabio Guerrero

*Escuela de Ingenierías Eléctrica y Electrónica
Universidad del Valle, Cali, Colombia
E-mail: fguerrero@univalle.edu.co
Teléfono: 3392140 Ext 109*

Oliver Cardona

*Gemedco S.A. Cali, Colombia
E-mail: oliver.cardona@gemedco.com.co*

Miguel Fuertes

*Grupo de Investigación Sistel-UV
Cali, Colombia
E-mail: miguelfb83@hotmail.com*

Fecha de recepción: 06-02-2007

Fecha de selección: 10-05-2007

Fecha de aceptación: 30-04-2007

ABSTRACT

In this article an analysis of interference both in time and frequency between the wireless technologies Bluetooth 2.0 + EDR and IEEE 802.11g operating in the ISM band is presented. Also the interference between piconets Bluetooth while operating in the same range of coverage is analyzed. The most relevant aspects of the analysis, oriented to typical situations found in practice, are presented.

KEY WORDS

Bluetooth, IEEE 802.11g, Wi-Fi, interference analysis, Wireless Local Area Networks (WLAN), Wireless Personal Area Networks (WPAN).

RESUMEN

En este artículo se presenta un análisis de interferencia en tiempo

y en frecuencia entre las tecnologías inalámbricas Bluetooth 2.0 +EDR e IEEE 802.11g operando en la banda ISM. Además se estudia la interferencia que perciben dos piconets Bluetooth cuando se encuentran operando en el mismo rango de cobertura. Se presentan los aspectos más relevantes del análisis, orientado a situaciones típicas encontradas en la práctica.

PALABRAS CLAVE

Bluetooth, IEEE 802.11g, Wi-Fi, análisis de interferencia, redes inalámbricas de área local (WLAN), redes inalámbricas de área personal (WPAN).

Clasificación Colciencias: B

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el uso de dispositivos equipados con las tecnologías inalámbricas Bluetooth e IEEE 802.11g ha crecido muy rápidamente. Dado que las dos tecnologías trabajan en la misma banda, ISM (Industrial, Scientific and Medical) de 2.4 GHz, y esta a su vez es de uso libre (es decir, no se requiere licencia a título primario) existe interés en estudiar los efectos de la interferencia que las dos tecnologías se pueden causar entre sí cuando operan sobre el mismo rango de cobertura y, en general, cuando varias redes inalámbricas operando en la misma banda de frecuencia coexisten en un mismo rango de cobertura.

Este trabajo es el resultado del entendimiento ganado por los autores a través de proyectos de simulación de la capa física de los estándares Bluetooth v2.0 +EDR y IEEE 802.11g llevados a cabo en.^{1 y 2} Este artículo está escrito con una orientación esencialmente educacional que busca estimular este tipo de análisis sobre redes inalámbricas en Colombia. Se presume que el lector está razonablemente familiarizado con las tecnologías objeto de este artículo. Para una lectura introductoria sobre la tecnología Bluetooth se puede consultar.³ Para una descripción de los protocolos IEEE 802.11 y Bluetooth se puede consultar.⁴

El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el análisis de interferencia entre piconets Bluetooth, en la sección 3 se presenta el análisis de interferencia para la coexistencia entre redes IEEE 802.11g y Bluetooth, en la sección 4 se presentan un sumario

con las principales observaciones y conclusiones.

2. INTERFERENCIA ENTRE PICONETS BLUETOOTH

La capa física de Bluetooth usa FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) con un ancho de banda de dispersión de 79 MHz.⁵ El ancho de banda de 3 dB usado en cada salto es de 1 MHz, y un poco más para las modulaciones usadas en la versión 2.0 +EDR.

Dado que en el rango de cobertura de una piconet pueden estar operando otras piconets existe la posibilidad de que dos o más piconets colisionen en un salto dado al coincidir en el mismo canal de frecuencia. Así, la probabilidad de colisión en frecuencia entre dos piconets, expresada en porcentaje, está dada por: $P_{cf} = 1(100\%) = 1.27\%$. Generalizando, la probabilidad de colisión en frecuencia de N piconets sobre una piconet dada, suponiendo que al menos una haga colisión, es:

$$P_{cf}(N) = 1 - P_{ncf}(N) = 1 - \left(\frac{78}{79}\right)^N \quad (\text{Ec. 1})$$

donde P_{ncf} es la probabilidad de que ninguna piconet haga colisión en frecuencia.

Para compartir el canal de transmisión entre el maestro y los esclavos Bluetooth usa un esquema de división de tiempo dúplex (TDD), donde el transmisor y el receptor usan el canal alternadamente durante intervalos de longitud fija para transmitir sus paquetes.

Es poco probable que dos piconets independientes que operan en el mismo

rango de cobertura estén totalmente sincronizadas y que sus intervalos coincidan de forma precisa. Como se observa en la Figura 1, es más probable que la interferencia en el tiempo ocurra solamente sobre una parte del tiempo de transmisión de un paquete. Cuando la piconet interferente utiliza paquetes multislot (la especificación permite paquetes de tres o cinco intervalos) naturalmente la probabilidad de interferir en totalidad el paquete de la piconet deseada aumenta.

Tomando un paquete bandabase para transmisión de datos característico DH1 como ejemplo para el cálculo de la probabilidad de colisión de un paquete de un solo intervalo con otro paquete igual, se tiene:

$$P_{ct} = \frac{366 \mu s}{625 \mu s} (100\%) = 58.56\% \tag{Ec. 2}$$

donde 366μs es la longitud de tiempo para un paquete DH1 y 625 μs es la duración definida en un intervalo. Si los paquetes interferentes son multislot (por ejemplo un paquete de cinco intervalos), la probabilidad de colisión en el tiempo hacia un paquete deseado de un solo intervalo es:

$$P_{ct}] \frac{4(625 \pi s) + 366 \pi s}{3125 \pi s} (100\%)] 91.71\% \tag{Ec. 3}$$

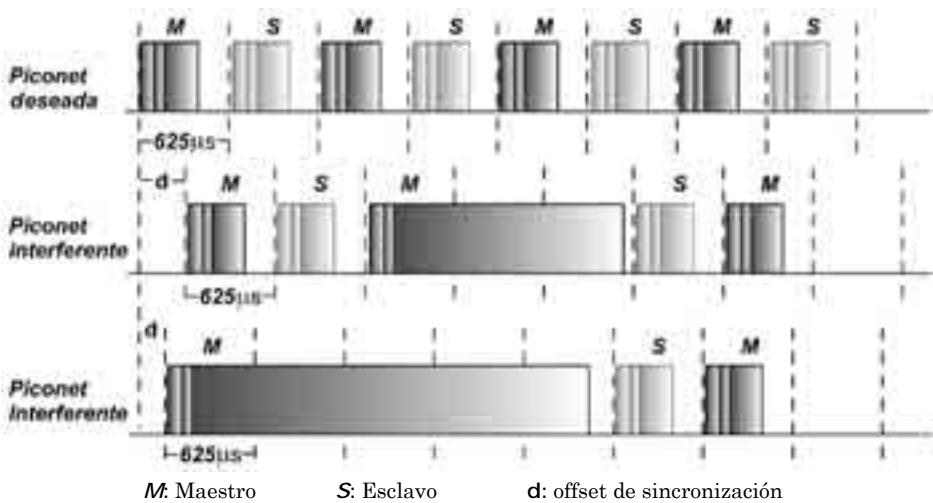


Figura 1. Ejemplos de interferencia entre paquetes.

De los cinco posibles paquetes interferentes existe la probabilidad de una colisión en frecuencia que asume una sola piconet interferente. Por lo tanto, la probabilidad de colisión en tiempo y frecuencia para una y para N piconets interferentes respectivamente están dadas por

$$P_{ctf} = P_{cf} P_{ct} \quad (\text{Ec.4})$$

$$P_{ctf}(N) = P_{cf}(N) \prod_{n=1}^N P_{ctn} \quad (\text{Ec.5})$$

Ahora, para encontrar la probabilidad de error de bit teniendo en cuenta la porción de un paquete que ha sido interferido, se deben tener en cuenta propiedades de la señal interferente tales como la intensidad o potencia de interferencia. Si P_{BERI} es la probabilidad de error de bit por interferencia relacionada con la potencia de la señal interferente, la probabilidad de error de colisión para L bits está dada por

$$P_e] \bigoplus_{n=1}^N \left(P_{cf}(N) \prod_{i=1}^{L(n)} P_{BERI}^i \right) \quad (\text{Ec.6})$$

Esta expresión determina la probabilidad de error de bit que N piconets puede provocar a L bits cuando hay colisión en frecuencia. La colisión del paquete en el tiempo está implícita en P_{BERI} , dado que la expresión asume siempre colisión de los paquetes en tiempo.

Para las modulaciones para tasa de transmisión aumentada,⁶ en la ecuación 6 se hablaría en términos de símbolos, P_{SERI} , en vez de P_{BERI} , y L sería el número de símbolos en los que puede haber colisión.

Generalizando, el desempeño del sistema ante interferencias estará estrechamente relacionado con la probabilidad en ausencia de colisiones por

$$P_s = 1 - P_{ctf} \quad (\text{Ec.7})$$

y el desempeño de supervivencia del paquete relacionado con la tasa de error de bit está dado por

$$P_{se} = 1 - P_e \quad (\text{Ec.8})$$

Para un mayor nivel de refinamiento, a la expresión anterior se podría agregar la mejora que pueden aportar los esquemas de codificación de canal FEC 2/3 (código Hamming) y FEC 1/3 (código de repetición de bits) definidos en la especificación dependiendo del tipo de paquete. Sin embargo, dado que la capacidad de corrección de errores de estos códigos es bastante limitada, la expresión no se alterará significativamente.

3. COEXISTENCIA DE BLUETOOTH CON IEEE 802.11g

Aunque el estándar IEEE 802.11g define cuatro posibles capas físicas,⁷ en este trabajo se considera únicamente la capa ERP-OFDM (Extended Rate Physical Layer - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) debido a su mayor aceptación comercial para operación en la banda ISM. La especificación define un ancho de banda de 20 MHz, dividido en 64 portadoras, con un espaciamiento en frecuencia entre subportadoras, Δ_F , de 0.3125 MHz (esto es 20 MHz / 64). El tiempo de un símbolo OFDM es $4\mu s$, con

un tiempo de guarda de $800ns$ para combatir efectos multitrayectoria, dando un tiempo efectivo de actividad es $3.2\mu s$ (esto es, $1/\Delta_f$). Al núcleo de la capa física se encuentra un procesador IFFT/FFT (Inverse / Fast Fourier Transform) de 64 muestras para generar la señal OFDM. Las 64 muestras del procesador IFFT/FFT generan 64 sub-portadoras

de las cuales 48 son usadas para el transporte de datos, cuatro se utilizan para señales piloto y una subportadora central cero para sincronización del símbolo OFDM, el resto de las subpotadoras son puestas en cero para evitar la interferencia con las bandas adyacentes. Entonces el ancho de banda efectivo del sistema es

$$BW_{OFDM} = (48 + 5) 312.5 \text{ kHz} = 16.5625 \text{ MHz} \tag{Ec.9}$$

Una trama MAC IEEE 802.11 puede transportar hasta un máximo de 2312 octetos de carga útil como se observa en la Figura 2.

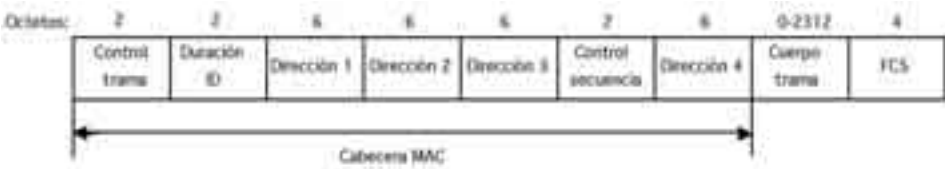


Figura 2. Formato de una trama IEEE 802.11g.

Estos datos son codificados con un codificador convolucional de tasa de $1/2$, que provee para la capa OFDM tasas de transmisión de 6, 12 y 24 Mbit/s, empleando modulaciones BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quaternary Phase Shift Keying) y 16-QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation) respectivamente para cada velocidad. Así, para cada tasa de transmisión los datos de cada sub-portadora son modulados con el respectivo mapeo. Empleando un procedimiento de perforado (eliminación de bits) al codificador se pueden obtener tasas de codificación de $2/3$ y $3/4$ que proveen tasas de transmisión de 9, 18, 36, 48 y 54 Mbit/s, emplean-

do las modulaciones nombradas anteriormente y 64 QAM, para las dos más altas tasas de transmisión. En la Tabla 1 se resumen las tasas de transmisión definidas.

Como se mencionó en la Sección 2, Bluetooth realiza saltos de frecuencia sobre 79 canales de 1 MHz cada uno, visitados aleatoriamente con probabilidad uniforme. Dado que el ancho de banda efectivo de una transmisión IEEE 802.11g OFDM es de 16.25 MHz, es claro que existirá una zona estadística de interferencia. Para que una transmisión Bluetooth afecte o destruya completamente una trama 802.11g, debe presentarse

Tabla 1. Modos de transmisión de IEEE 802.11g OFDM.

Modo	Modulación	Índice de codificación	Tasa de transmisión Mbit/s]
1	BPSK	1/2	6
2	BPSK	3/4	9
3	QPSK	1/2	12
4	QPSK	3/4	18
5	16-QAM	1/2	24
6	16-QAM	3/4	36
7	64-QAM	2/3	48
8	64-QAM	3/4	54

traslape en tiempo y frecuencia como se observa en la Figura 3, donde se muestra una transmisión Bluetooth para la cual un salto en frecuencia cae dentro de la banda 802.11g y otro fuera de la banda.

Por lo tanto, la probabilidad de colisión en frecuencia entre una transmisión Bluetooth y una IEEE 802.11g OFDM asumiendo una transmisión continua en ambas aplicaciones, se puede concluir que la probabilidad

de que un salto caiga dentro de la banda 802.11g es:

$$P_i = \frac{16.6}{79} (100\%) \approx 21\% \quad (\text{Ec.10})$$

Para el análisis de interferencia en el dominio del tiempo el peor caso se tiene cuando se transmite una MPDU (MAC Protocol Data Unit) del máximo tamaño posible, esto es, 2346 bytes; y la menor velocidad de transmisión que permite la especificación, es decir, 6 Mbps. En este caso se tiene

$$\begin{aligned} \text{Tiempo transmisión trama 802.11g} &= T_{SHORT} + T_{LONG} + T_{SIGNAL} + (T_{SYM} \times N_{SIM}) \quad (\text{Ec.11}) \\ &= 8\mu s + 8\mu s + 4\mu s + (4\mu s \times 782) = 3148 \mu s \end{aligned}$$

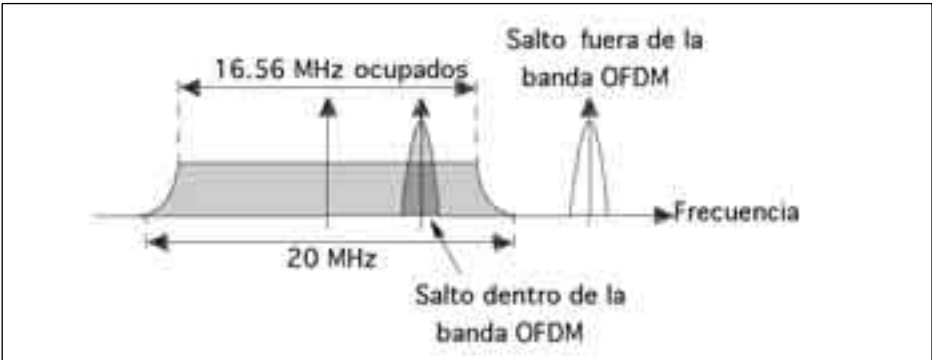


Figura 3. Colisión entre IEEE 802.11g y Bluetooth

donde $T_{SHORT} + T_{LONG}$ es la duración del preámbulo, T_{SIGNAL} es la duración del campo signal, T_{SYM} es la duración de un símbolo OFDM y N_{SIM} es el número de símbolos en el campo DATA (ver Figura 4).

Dado que el tiempo de transmisión en Bluetooth es menor o igual a $625 \mu s$, una transmisión 802.11g puede ser interferida hasta por seis intervalos de Bluetooth, como se ilustra en la Figura 5.

Ahora bien, dado que el ancho en banda en cada salto en Bluetooth es 1 MHz mientras que para OFDM

cada subportadora ocupa un ancho de 0,3125 MHz, en una transmisión OFDM interferida se pueden ver afectadas hasta cuatro subportadoras consecutivas, lo cual ocurre en una probabilidad del 21% (Ec.10). No obstante, la magnitud de la interferencia va a depender de la ubicación geográfica del transmisor y el receptor de ambas tecnologías, y de la potencia de transmisión. En la gran mayoría de aplicaciones prácticas la potencia de transmisión usada en 802.11g es 100 mW, mientras que para Bluetooth la potencia de transmisión es 2.5 mW. Si el tamaño de

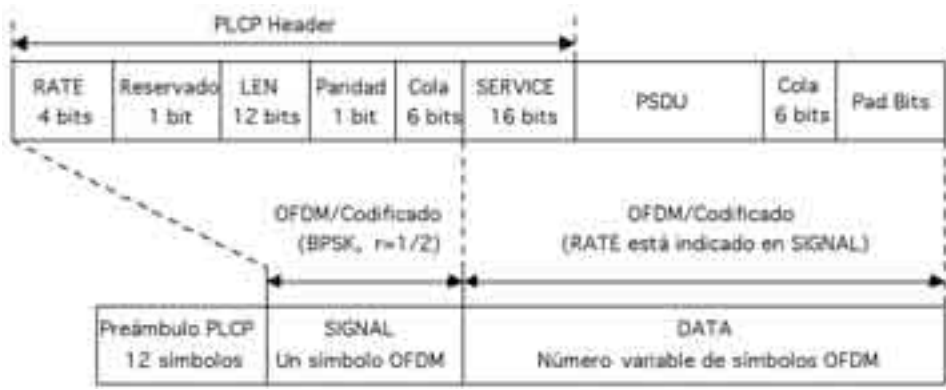


Figura 4. Formato trama IEEE 802.11g en la capa física.

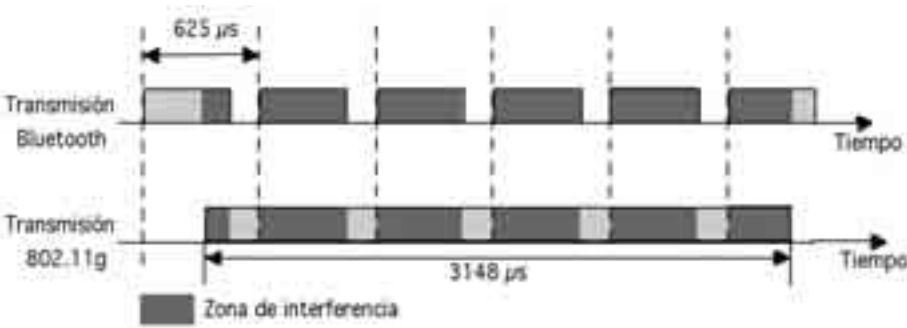


Figura 5. Colisión de tramas IEEE 802.11g y Bluetooth.

la MPDU disminuye de modo que el tiempo de transmisión sea inferior al de la trama Bluetooth, la probabilidad de interferencia se reduce, debido al tiempo en el que el canal está disponible. Las subportadoras afectadas en OFDM poseen además información previamente codificada para habilitar la corrección de errores en el receptor, además, no transportan información consecutiva debido al intercalamiento (*interleaving*) que recomienda el estándar para facilitar la tarea de decodificación Viterbi en la señal recibida.

4. CONCLUSIONES

En resumen, del análisis de interferencia de una transmisión Bluetooth sobre una transmisión 802.11g se tiene lo siguiente:

1. Las dos transmisiones deben coincidir en tiempo y frecuencia, lo que ya representa una probabilidad relativamente baja (inferior al 21%).
2. La trayectoria entre el transmisor y el receptor de 802.11g debe ser lo suficientemente grande o estar lo suficientemente obstruida, para que la potencia de la señal recibida esté alrededor de la potencia de una transmisión Bluetooth (típicamente 4 dBm).
3. El transmisor Bluetooth debe estar muy cerca del receptor OFDM, pues la pérdida de trayectoria disipa la energía de la transmisión.
4. En cada transmisión OFDM interferida existe la probabilidad de que se vean afectadas hasta cuatro subportadoras consecutivas.

5. Dado que OFDM ocupa 16.56 MHz quedan entonces 63 saltos disponibles para Bluetooth. A partir de esto se puede concluir que ambas tecnologías pueden coexistir en un espacio determinado con una adecuada planificación de saltos Bluetooth.
6. En el peor de los casos, cuando existan varias redes WLAN IEEE 802.11g superpuestas por cobertura estas ocuparían un ancho de banda efectivo aproximado de 50 MHz (16.6×3) sobre la banda ISM (el estándar IEEE 802.11g permite varios arreglos de tres redes WLAN superpuestas en cobertura utilizando distintas zonas del espectro de la banda ISM), lo que en teoría dejaría para Bluetooth un ancho de Banda de 29 MHz aproximadamente.
7. Los posibles errores en la transmisión, en general, pueden ser contrarrestados por el sistema de corrección de errores junto con el esquema de intercalamiento (*interleaving*) presente en la capa MAC.

La solución por parte de Bluetooth, para permitir una coexistencia amigable con redes WLAN IEEE 802.11g, el grupo de desarrollo Bluetooth SIG y el grupo de trabajo TG2 de IEEE 802.15 para redes WPAN (Wireless Personal Area Network) han encontrado varias soluciones, y la más aceptada es el esquema de saltos adaptables de frecuencia.

Este esquema permite bloquear o anular canales de saltos en los que se encuentren mucha interferencia, ruido o haya otra tecnología usándolos; la especificación determina que el mínimo número de canales debe

ser 20 y el máximo 79. De esta forma Bluetooth no empleará los canales bloqueados, sin que se degrade su propio desempeño, y por tanto se minimice la probabilidad de colisión entre las dos tecnologías.

Se concluye finalmente que la tecnología de redes inalámbricas de área local IEEE 802.11g ERP-OFDM en la práctica es muy poco susceptible a la interferencia proveniente de una red Bluetooth, con lo cual se garantiza una coexistencia en armonía de estas dos tecnologías, las cuales son, después de todo, tecnologías complementarias y no rivales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Fuertes, M. Simulación de la capa física y MAC para redes de área personal (Core v2.0 + EDR). Trabajo de Grado, Universidad del Valle, 2006.
2. Cardona, O. Simulación de la Capa Física para Redes Inalámbricas de Área Local WLAN IEEE 802.11g. Trabajo de Grado, Universidad del Valle, 2006.
3. McDermott-Wells, P. What is Bluetooth? IEEE Potentials, Volume 23, Issue 5, Jan. 2005.
4. Ferro, E, and Potorti, F. Bluetooth and Wi-Fi wireless protocols: a survey and a comparison. IEEE Wireless Communications. Vol. 12, Issue 1, Feb. 2005. pp. 12-26.
5. Specification of the Bluetooth System. Covered Core Package Version: 2.0 + EDR. Bluetooth SIG, Nov. 2004. Vols. 1-4.
6. Specification of the Bluetooth System. Covered Core Package Version: 2.0 + EDR. Op. cit. Vol. 2 Part A ch. 3.2 Enhanced Data Rate, p34-38.
7. IEEE STANDARDS. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band. IEEE Std 802.11g™. Estados Unidos, 2003.

CURRÍCULOS

Fabio Guerrero. Ingeniero electrónico de la Universidad del Cauca, 1992. Magíster en Real Time Electronic Systems, Bradford University (UK), 1995. Actualmente se desempeña como profesor asistente de la Escuela de Ingenierías Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle en el Área de Telecomunicaciones. E-mail: fguerrero@univalle.edu.co

Oliver Cardona. Ingeniero electrónico de la Universidad del Valle, 2007. Actualmente se desempeña como ingeniero de soporte en la empresa Gemedco S.A. E-mail: oliver.cardona@gemedco.com.co

Miguel Fuertes. Ingeniero electrónico de la Universidad del Valle, 2007. Actualmente se desempeña como ingeniero de apoyo al grupo de investigación en sistemas de telecomunicaciones Sistel-UV de la Universidad del Valle. E-mail: miguelfb83@hotmail.com 